

大和ハウス工業株式会社
大阪市立大学大学院工学研究科

正会員 ○宇佐美 仁貴
正会員 重松 孝昌

1. 研究背景・目的

地震動により励起される液面揺動（スロッシング）は、貯蔵液体を溢流させたり、構造物の破損等を引き起こす場合がある。2013年3月11日に発生した東日本大震災では、震源から遠く離れた浄水場の沈殿池において傾斜板が変形・落下するなどの被害が報告されており、スロッシングが発生したためではないかと考えられている。今後、高い確率で南海トラフ地震や直下型地震などの強震動を伴う地震が発生すると言われており、被災後の迅速な水供給の観点から、傾斜板の変形・落下対策を講じておく必要がある。

スロッシングに関する研究は古くからなされており、ポテンシャル理論によりおおよそ予測が可能である。これまでに、スロッシングの振動特性の把握やスロッシングの減衰対策などに関する研究¹⁾は、数多く成されている。しかし、その研究の多くは容器内に液体のみが存在する場合のスロッシングが対象であり、容器内に傾斜板などの構造物が存在する場合のスロッシングについての知見はほとんど無い。

そこで、本研究では、矩形容器を対象としてスロッシングに関する模型実験を行い、傾斜板模型の設置を模擬した実験を行うことによって、スロッシングに及ぼす傾斜板の影響を把握し、傾斜板破損の原因解明のための基礎的知見を得ることを目的とする。

2. 実験概要

実験は、図-1に示すような長さ0.90m、幅0.30m、高さ0.37mの矩形水槽を3次元振動台上に設置し（図-2参照）、PCを用いて次式のような正弦関数で振動台の運動を制御して、スロッシングを発現させた。

$$\xi_x = \xi_{0x} \sin(2\pi f_x t), \quad \xi_y = \xi_{0y} \sin(2\pi f_y t) \quad (1)$$

ここに、 ξ_x 、 ξ_y は x および y 方向の変位、 ξ_{0x} 、 ξ_{0y} はそれぞれの方向の変位振幅、 f_x 、 f_y はそれぞれの方向の振動周波数、 t は時間である。振動台に固定したビデオカメラ（SONY製、HDR-CX520）を用いて水槽内の水面変動の様子を撮影し、静止画像として保存した画像に対して解析を行い、水位変動の経時変化を求めた。静止画像は、30Hzで撮影されている。

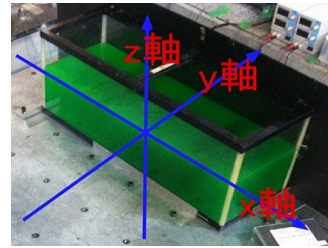


図-1 矩形水槽

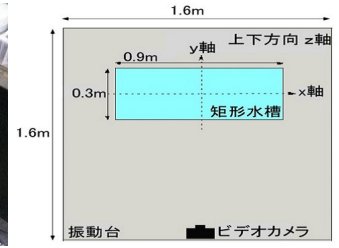


図-2 実験装置平面図

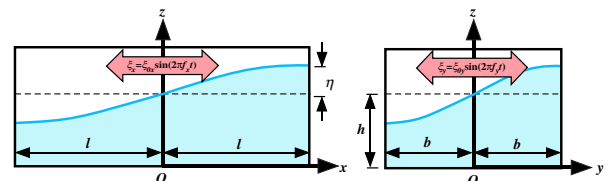


図-3 矩形容器の正弦波振動

矩形容器内でスロッシングが発生する振動数は、速度ポテンシャル理論²⁾により、次式で求められる。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(2n-1)\pi g}{L} \tanh\left(\frac{(2n-1)\pi h}{L}\right)} \quad (2)$$

ここに、 L は振動方向の矩形容器の幅、 h は水深、 g は重力加速度、 n は液体の振動モードである。本実験では、1次振動モードのみに着目する。

実験では、まず、水槽内に着色した水を入れ、水深 h を0.08、0.16、0.20mと変化させて、式(2)で求められるスロッシング振動数で振動台を正弦振動させてスロッシングの発現状況を確認した。このとき、振動方向は一軸方向のみとし、溢流しない程度の加振振幅を実験によって試行錯誤して決定した。水深および加振条件を表-1に示す。図-5に示すように、 $h=0.08$ mの場合には、水深が小さすぎるために進行波が発生してスロッシングが発生しなかった。 $h=0.16$ 、0.20mの場合には、スロッシングが発現し、応答波形は理論解とほぼ一致した。そこで、以下の実験では $h=0.20$ mで行うこととした。

表-1 加振条件

h (m)	x 方向		y 方向	
	f_x (Hz)	ξ_{0x} [m]	f_y (Hz)	ξ_{0y}
0.08	0.486	0.005	1.335	0.002
0.16	0.662	0.005	1.563	0.002
0.20	0.724	0.005	1.587	0.002

本実験では、図-6に示すように、プロピレン製の板を60度傾斜させて、水槽長さに対して半分

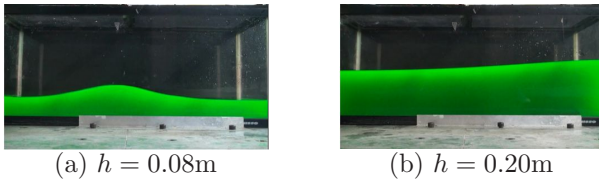


図-4 スロッシング発現状況

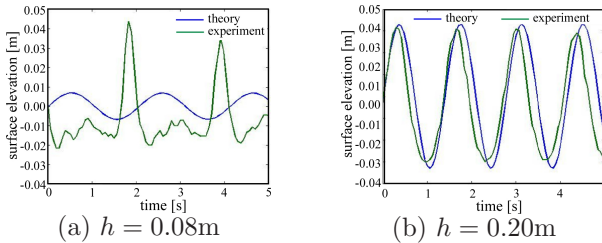


図-5 スロッシング応答波形 ($x = \ell$)

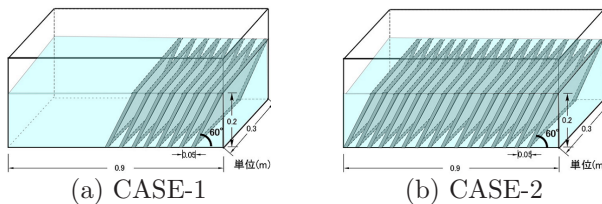


図-6 実験における傾斜板設置状況

(CASE-1) および全領域 (CASE-2) に設置した場合について、スロッシングに及ぼす影響について検討した。

3. 実験結果・考察

図-7は、 x 方向に加振した場合の $x = \ell$ における水位変動の時刻歴変化の実験値と理論値の比較を示したものである。これらの図によると、傾斜板が水槽内にある場合には、応答波高が極めて小さくなることがわかる。これは、傾斜板の法線の主方向がスロッシングによる流速の卓越方向と一致しているため、傾斜板が大きな抵抗となっているためであると考えられる。

図-8は、 y 方向に加振した場合の両者の比較を示したものである。この時、傾斜板の接線方向と流体運動の卓越方向が一致するため、実験値の変動は理論値のそれよりも若干小さくなるに留まっている。このことから、傾斜板に作用する流体力は、 x 方向加振の場合と比較すると小さくとなると考えられる。

図-9(a)は、 y 方向に 1.587Hz で加振した場合の水面形状の一例を示したものである。同図より明らかなように、水面形状は x 方向に有意な分布を持つことがわかる。一方、同図 (b) は、 $x = 0$ における水位変動の経時変化を示しているが、流体のみの水位変動を示す理論値よりも傾斜板を設置した場合の水位変動の方がその変動が大きくなることがわかる。したがって、端部に設置された傾斜板には比較的大きな流体力が作用するのではないかと推測され、このような部分で沈

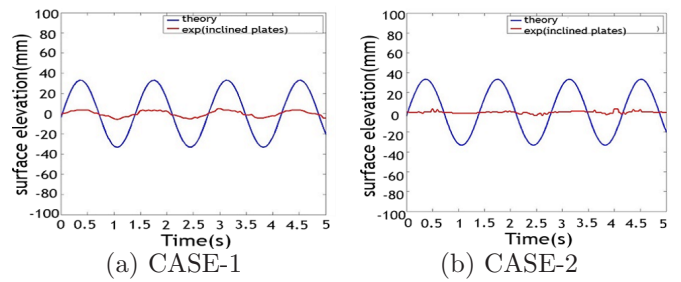


図-7 水位変動 ($x = \ell$, $\xi_{0x}=0.005\text{m}$, $\xi_{0x}=0.000\text{m}$)

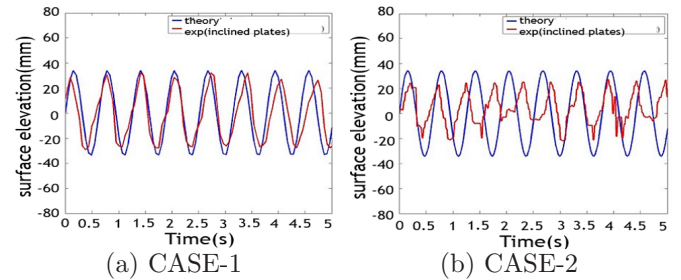


図-8 水位変動 ($y = b$, $\xi_{0x}=0.000\text{m}$, $\xi_{0y}=0.002\text{m}$)

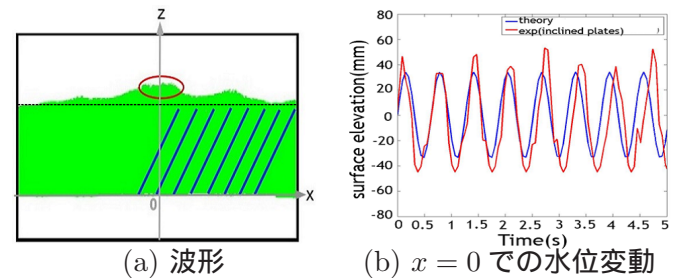


図-9 CASE-1 の水位変動 ($\xi_{0x}=0.000\text{m}$, $\xi_{0y}=0.002\text{m}$)

殿池内の傾斜板が被害を受けるのではないかと推察される。

4. 結論

本研究によって、傾斜板の法線主方向と加振方向によって、スロッシングによる水位変動は大きく抑制される場合があることが明らかになった。このことは傾斜板に大きな力が作用していることを意味し、したがって、加振方向によっては傾斜板の著しい被害が予想される。一般的には、沈殿池では流路に対して直角方向に法線が向くように傾斜板が設置されているので、本実験結果から、流軸に対して直角方向の地震動が卓越するときに傾斜板への被害が発現する考えられる。また、水槽の一部に傾斜板が設置された場合には、その端部において水位変動が大きくなる可能性が確認されたことから、端部の傾斜板に作用する流体力が大きくなる可能性が指摘できる。

参考文献

- 1) 池田ら：矩形断面容器におけるスロッシング対策案の検討，応用力学論文集，Vol.11，pp.549-556．2008．
- 2) 田宮 真：遊動水の動的影響について，造船協会論文集，第 103 号，pp.59-67．1958．